

# ГІДРОДИНАМІКА ОБТІКАННЯ V-ПОДІБНОГО ВИСТУПУ ПРИ ЛАМІНАРНОМУ І ТУРБУЛЕНТНОМУ РЕЖИМАХ

Г. Г. Єгіазарян<sup>1, а</sup>, А. А. Халатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України

## Анотація

У даній роботі наведено результати комп'ютерного моделювання обтікання V-подібного виступу у плоскопаралельному каналі. Розрахунок проводився для діапазону чисел Рейнольдса 580 та 2800. Зроблена порівняльна характеристика при двох режимах течії – ламінарному і турбулентному

**Ключові слова:** оребрення, обтікання виступу, вихрові структури

## Вступ

В даний час газотурбінний двигун (ГТЕ) — тип теплового двигуна, що має тенденції до динамічного розвитку у світовій енергетичній галузі. Досягнення високої рентабельності газотурбінних двигунів та установок на їх основі обумовлено, перш за все, збільшенням температури газу перед турбіною, досягаючи  $1600^{\circ}\text{C}$  у потужних газотурбінних двигунах. Тривалість експлуатації газотурбінних двигунів (більше 150 тисяч годин) із збільшенням температури газу забезпечується головним чином шляхом вдосконалення систем охолодження сопла та робочих лопаток.

Головною задачею інтенсифікації конвективного теплообміну є така дія на прилеглий шар, що зроби́ла би його більш тонким або частково зруйнувала його. З цією метою використовують мікрооребрення з висотою, що відповідає характерним розмірам прилеглої шару.

Аналіз стану питання показує, що найбільш доступним і ефективним методом керованого впливу на структуру турбулентного потоку є створення в ньому відривних зон або інших організованих вихрових структур. Щоб успішно використовувати відривні зони, треба знати механізм їх взаємодії з основним турбулентним потоком і процеси в самій відривній зоні.

Мікрооребрення має потенціал к використанню в різних частинах лопатки. Це дозволяє реалізувати велику кількість схем проектування, що відрізняються за кількістю радіальних каналів, кількістю окремих контурів охолодження конфігурацію, а також конфігурацію крайових турбулізаторів та схеми їх розташування в каналах охолодження. В даній роботі досліджується спрощена модель мікрооребрення – обтікання одиничного виступу.

## 1. Структура потоку при нормальному оребренні

Структуру потоку для нормального оребрення зображено на рисунку 1

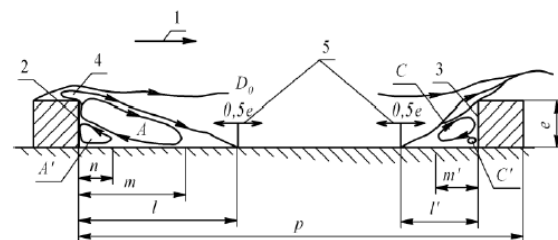


Рис. 1. Структура вихрових зон при обтіканні прямокутного ребра  $p/e = 8$ . 1 – напрям основного потоку; 2 – задня стінка; 3 – передня стінка; 4 – зворотна течія; 5 – область нестационарних коливань.  $A', A, C, C'$  – вихори,  $n, m, l, m', l'$  – границі зон

Вторинні вихрі в безпосередній близькості до ребер з одного боку значно турбулізують течію, але при цьому збільшують тертя і утворюють «застой», що також заважають конвективним переносам тепла.

Вплив конфігурації на теплообмін був детально вивчений в роботі [1]

У структурі потоку спостерігаються такі характерні області:

— головна зона відриву. Її довжина  $l$  визначається до перетину приєднання, в якому ще помітна зворотна течія в зону відриву. Довжина цієї зони нестабільна і коливається в межах  $0,5e$ ;

— двовимірна зона відриву. Її довжина  $m$  визначається перетином, в якому стає помітним локальна течія пристінкового шару від зони відриву вниз за течією. Витягнутий двовимірний вихор  $A$  досягає верхньої частини задньої стінки турбулізатора, «живить» зворотна течія на верхній кромці турбулізатора;

<sup>а</sup>gevorgvandervaals@gmail.com

— невеликий істотно нестационарний вихор  $A'$  довжиною  $n$ ;

— перед турбулізаторами знову утворюється відривна зона довжиною  $l'$ , яка також нестабільна і коливається в межах  $0.5\epsilon$ . На верхній межі зони спостережується інтенсивне турбулентне перемішування. Усередині відривної зони існує область двовимірного вихору  $m$ . У кутку спостерігається третя область з маленьким вихором  $C'$ . Така структура течії характеризується наступним:

— потік маси з основної течії в головну зону відриву надходить в основному на кордоні області близько до точки приєднання. Відповідний йому потік маси із зони відриву в основну течію зосереджений безпосередньо за турбулізаторами;

— витрати енергії потоки, пов'язані з подоланням гідравлічного опору уступу, витрачаються на підтримку вихрових зон і в підсумку на збільшення турбулентності потоку, тобто на збільшення енергії турбулентних пульсацій;

— найбільша турбулентність, що значно перевищує її дисипації, спостерігається на віддаленій від стінки верхньої межі вихрової зони, де градієнт швидкості має максимальні значення. У міру віддалення від верхньої межі до стінки в фіксованому перетині різниця між турбулентністю і дисипацією енергії турбулентних пульсацій різко падає. На значній ділянці вихрової зони, що прилягає до стінки, переважає дисипація, при тому що у стінки спостерігається другий максимум виробітку турбулентності;

— кінетична енергія, передана пульсаційним рухам в зоні вихору, переноситься потоком вниз за течією і дисипує значно нижче по потоку, збільшуючи турбулентність на значній відстані від вихору.

Мікрооребрення має потенціал к використанню в різних частинах лопатки. Це дозволяє реалізувати велику кількість схем проектування, що відрізняються за кількістю радіальних каналів, кількістю окремих контурів охолодження конфігурацію, а також конфігурацію крайових турбулізаторів та схеми їх розташування в каналах охолодження.

В гладкому каналі найбільший вплив на тертя має число Рейнольдса. При оребренні каналу можна припустити, що вплив числа Рейнольдса на коефіцієнт тертя значно менший, ніж тертя пов'язане з оребренням. Дана гіпотеза цілком підтверджується роботами [2], [3]

Подальші дослідження, серед яких можна відзначити [4], [2] були спрямовані на пошук більш ефективних конфігурацій оребрення, зокрема V-образних схем. У роботах показано, що нахил ребер і їх злам призводить до виникнення вторинних течій в каналі які впливають не тільки на локальний теплообмін, а й його середні значення. З іншого боку, всі попередні роботи вивчають особливості конкретних конфігурацій, але не робить ніяких загальних висновків про геометрію ребер.

Подальші дослідження були спрямовані на пошук більш ефективних конфігурацій оребрення, зокрема V-подібних схем.

## 2. Математична модель

В якості середовища розглядається повітря, але за малих чисел Маха ( $< 0.4$ ), воно може описуватись як нестисливе середовище. Тому в якості математичної моделі поставленої задачі вибрано рівняння Нав'є-Стокса для нестисливого середовища та рівняння нерозривності.

Для чисел Маха даної задачі, повітря гарно описується моделлю нестисливої рідини, яка і була обрана для спрощення розрахунку.

### 2.1. Основні рівняння

Вихідні рівняння - Нав'є Стокса для нестисливої рідини і рівняння нерозривності.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1)$$

$$\text{div } \vec{v} = 0 \quad (2)$$

де  $v$  – поле швидкості,  $p$  – поле тиску,  $\rho$  – густина.

Рівняння замикаються емпіричною моделлю турбулентності. В даній роботі була обрана  $k-\epsilon$  модель, що добре себе зарекомендувала в подібних задачах. Найбільш широке поширення в задачах розрахунку теплообміну отримали двопараметричні диференціальні моделі турбулентності  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  і SST. Тестові розрахунки для порівняння моделей наведені в роботі [5]

Модель турбулентності  $k-\epsilon$  заснована на розрахунку двох параметрів турбулентності:  $k$  – кінетична енергія турбулентних пульсацій,  $\epsilon$  – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій, значення яких визначаються шляхом вирішення відповідних диференціальних рівнянь переносу. Стандартна модель турбулентності  $k-\epsilon$  побудована на припущенні про повністю розвинену турбулентну течію. Для коректного розрахунку прилежового шару, де проявляють себе в'язкі ефекти, модель турбулентності  $k-\epsilon$  включає в себе пристінкову функцію, яка містить універсальний профіль швидкості і зв'язує параметри течії з відстанню від стінки.

### 2.2. Граничні умови

Для розв'язку до рівнянь необхідно додати граничні умови для 4-х полів: двох основних  $p, v$  і двох додаткових для рівнянь турбулентності  $k, \epsilon$ .

Для поля швидкості задані умови плоского сталого профілю на вході і умова прилипання на стінках  $v = 0$ . Тиск задається сталим на виході з каналу. Для  $k, \epsilon$  на стінці функцію граничної умови виконують спеціальні пристінкові функції.

## 3. Чисельна модель і розрахунок

Розрахунок було зроблено у відкритому пакеті OpenFOAM, в основі якого лежить метод скінченних об'ємів. Для розрахунку обрано 2 випадки з числами Рейнольдса 480 і 2800, ламінарний і турбулентний

режим відповідно. Було побудовано тетрагональну сітку, приклад якої зображено на рисунку 2



Рис. 2. Тетрагональна сітка

При розрахунку використовувався стійкий алгоритм *rimpleFoam*. Під час розрахунку значення числа Куранта не перевищувало  $Co < 0.5 < 1$ , тому чисельний розв'язок має сходиться до розв'язку вісхідних рівнянь.

#### 4. Результати

Був проведений додатковий аналіз тиску, енергії турбулентності і завихреності вздовж лінії симетрії.

На рисунку 3 наведено розподіл поля тиску вздовж лінії симетрії.

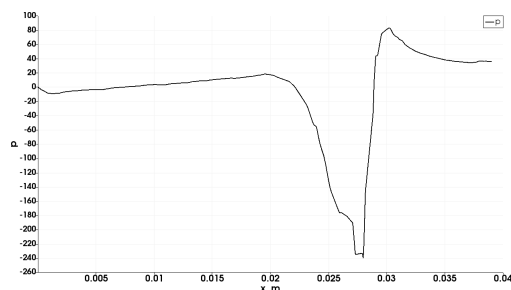


Рис. 3. Поле тиску вздовж лінії симетрії,  $z = 1.5$  мм

Аналізуючи графік на рисунку 3 можна помітити значний перепад тиску на рівні виступу. Далі від виступу тиск вирівнюється, але вже з меншим рівнем через гідравлічні втрати обтікання виступу. У той же час, зона за виступом характеризується підвищеною енергією турбулентності (рисунк 4). Через це, покращене перемішування може призвести до інтенсифікації теплообміну.

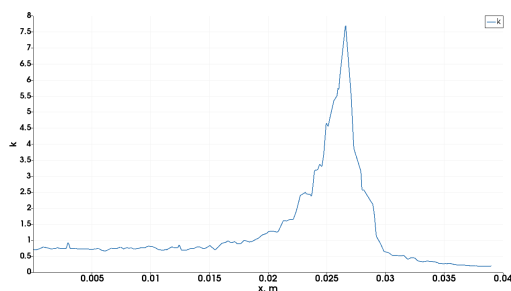


Рис. 4. Поле  $k$  вздовж лінії симетрії,  $z = 1.5$  мм

Окрім зміни кількісних характеристик, існує і якісна різниця між обтіканням виступу в турбулентному і ламінарному режимі. При ламінарному обтіканні V-подібного виступу, характер течії близький до обтікання нормального виступу, зображеного на рисунку 1. При турбулентному режимі, утворюються додаткові вихори, зображені на рисунку 5

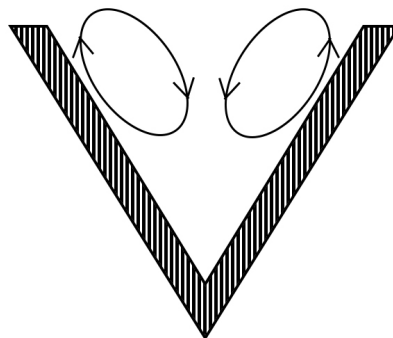


Рис. 5. Вихори при числі Рейнольдса  $Re = 3800$

#### Висновки

У зоні більш високих чисел Рейнольдса турбулізація примежового шару має кращі характеристики. За виступом при ламінарному режимі утворюється тільки один вихор в площині виступу, в турбулентному режимі утворюються також вихори в площині стінки.

#### Перелік використаних джерел

1. Письменный Д. Н. Теплообмен и гидродинамика в канале с микрооребрением применительно к охлаждению входных кромок лопаток газовых турбин. — 2012.
2. Lau S. C., Kukreja R. T., McMillin R. D. Effect of V-shaped rib array on turbulent heat transfer and friction of fully developed flow in a square channel // Journal of heat mass transfer. — 1991.
3. Лобанов И. Е. Моделирование интенсифицированного теплообмена в трубах с относительно высокими турбулизаторами // Вестник машиностроения. — 2011. — № 3. — С. 25–32.
4. M.E. Taslim T. Li D. M. Kercher. Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped and discrete ribs on two opposite walls. — 1994.
5. Хан. Теплообмен и трение в каналах с двумя ребренными противоположными стенками. — Теплопередача, 1984.